

잠열재를 이용한 이동식 저온 컨테이너 및 사과 내부온도 유지특성

권기현[†] · 김종훈 · 정진웅
한국식품연구원

Characteristics Maintenance Internal Temperature of Apple and Portable Low-Temperature Container by Using Phase Change Materials

Ki-Hyun Kwon[†], Jong-Hoon Kim and Jin-Woung Jeong
Korea Food Research Institute, Seongnam 463-746, Korea

Abstract

By considering the storage temperatures of agricultural products, three types of PCMs (K_1 , K_2 , K_3) were developed to be used in temperature ranges of 0~5°C, 5~10°C and 10~15°C. K_1 PCM for 0~5°C was developed by mixture of $C_{14}H_{30}$ and sodium polyacrylate, and K_2 PCM for 5~10°C and K_3 PCM for 10~15°C were mixture of $C_{14}H_{30}$, $C_{18}H_{38}$ and sodium polyacrylate with different composition ratio. The target temperatures of cold chain system were set at 7°C, 13°C, and 17°C with $K_{1,3}$, $K_{2,3}$, and $K_{3,1}$ PCMs, respectively. The times to reach the target temperatures in the storage chamber were 21 hours, 18 hours, and 61 hours with K_1 , K_2 , and K_3 PCMs, respectively. The performances of natural convection type and forced convection of the temperature controlled portable container were analyzed. Apples were stored in the portable container of 5°C, and temperatures at surface and center were measured. The initial temperature of the apple was 25°C. The temperatures of apple at the surface and the center were 15°C and 16°C, respectively, after 5 hours with natural convection type. However, the temperatures at the surface and the center were already reached to 7°C within 1 hour with forced convection type. The forced convection type showed the better performance and the temperatures of portable container were maintained more than 15 hours.

Key words : portable container, forced convection, natural convection, phase change material

서 론

국내의 농산물 유통산업은 규모나 질적인 면에서 괄목할 만한 성장세를 유지하고 있다. 특히, 국민생활수준 향상과 식생활의 서구화로 인하여 패스트푸드, 육류, 어패류, 신선편이 농산물 및 식품은 저온유통 시스템에 의한 물류량이 증가되고 있으며, 이에 따라 장·단거리 운반 수단으로 사용되는 냉동차량 및 냉동·냉장용 저장창고, 쇼케이스, 물류용 냉장용기 등에 관련된 산업 역시 지속적인 성장을 거듭하고 있다.

농산물 호흡에 영향을 미치는 인자로는 품종, 숙성도, 조직 내 축적된 영양 성분의 조성, 산물 크기, 과피 상태

및 과육을 구성하고 있는 조직 형태의 내적 인자와 온도, 에틸렌, 산소, 탄산가스 농도, 생장조절제 및 과육손상 정도의 외적 인자로 나눌 수 있는데, 그 중에서 온도가 청과물 호흡에 영향을 미치는 주요 인자로 분석하였으며, 일반적으로 인과류(사과, 배 등)는 얼거나 저온장해를 발생하지 않을 정도의 최대한 낮은 온도로 급속 냉각하여 보관할 때 효과가 가장 우수한 것으로 보고하였다(1). 서로 다른 상변화 온도를 가지는 상변화 물질을 사용한 축냉 모듈의 열 성능에 관하여 보고하였으며(2), 잠열재를 열매체로 하는 실제 냉방설비의 운전특성을 평가하기 위해서 냉방장치는 800×800×100 mm³로 축냉 용기 8개를 내부에 장착한 5×6×3.5 m³ 규모의 실험용 컨테이너를 제작하여 실험한 결과를 나타내었다(3), 축냉식 냉동 탑 차와 일반 냉동차로 비교 실험하였으며, 측정방법은 일반식과 축냉식 냉동차간

[†]Corresponding author. E-mail : kkh@kfri.re.kr,
Phone : 82-31-780-9258, Fax : 82-31-780-9144

의 구조차이로 인하여 측정부위나 측정지점이 차이가 있다 (4). 축냉식 수송겸용 냉동/냉장고를 수송되지 않는 동안 심야열원을 이용하여 잠열재를 상변화 시켜 냉열을 저장하면서 농산물을 차량에 적재하고, 수송하는 동안 수송겸용 냉동/냉장고 상부에 설치된 축냉기로 부터 상부의 공기가 자연적으로 하강하여 수송겸용 냉동/냉장고 내부를 냉각하는 방식으로 잠열재 적용연구를 수행하였다(5).

본 연구에서는 농산물 유통에서 취급과 수송이 용이하면서 별도의 열 공급 없이 이동과 수송이 가능한 이동식 저온 컨테이너를 제작하여 자연대류와 강제대류 냉각 순환방식으로 농산물 유통에 필요한 잠열재, 고내 그리고 사과 품은 등 온도변화 및 특성을 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

본 실험에서는 경북 영주 능금영농조합에서 수확된 부사 품종을 대과, 중과를 구입하여 항온기에 저장한 후 시료로 사용하였으며, 잠열재로서 신 등(6)의 물, 망초(Na_2SO_4), 파라핀 계열 물질 등을 사용하였으며, 이 등(7)은 5.8°C 에서 상변화를 일으키는 tetradecane을 내부물질로 사용하였다. 본 연구에서는 단위 축열 물질인 물(Water), 고 흡수성 수지(Sodium polyacrylate), 에탄올(Ethanol), 파라핀(Paraffin)계 등을 사용하였으며(8), 이중 물 및 에탄올은 잠열재 실험을 위해 비교구로 사용하였고, 고 흡수성 수지와 테트라데칸(tetradecane)의 C_{14} , C_{18} 등을 주 물질로 사용하였다. 실험에 사용한 재료는 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ (wt 30%, J&C 마이크로 케미컬, 한국) 과 $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ (wt 30%, J&C 마이크로 케미컬, 한국)을 사용하여 농산물 유통에 적합하도록 K_{1-1} , K_{1-2} , K_{1-3} , K_{2-1} , K_{2-2} , K_{2-3} , K_{3-1} , K_{3-2} , K_{3-3} 의 총 9가지의 처리구로 구분하여 제조하였다. 각 물질을 구성하는 물질의 배합은 K_1 은 설정온도 $0\sim 5^\circ\text{C}$ 에서 온도구간이 유지되도록 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ 과 Sodium polyacrylate로 제조하였고, K_2 는 설정온도 $5\sim 10^\circ\text{C}$ 에서 온도구간이 유지되도록 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$, $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ 그리고 Sodium polyacrylate로 제조하였다. 또한 K_3 은 설정온도 $10\sim 15^\circ\text{C}$ 에서 온도구간이 유지되도록 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$, $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ 그리고 Sodium polyacrylate로 제조하였다. 잠열재를 제조한 후 폴리에틸렌(PE) 팩에 700 cm^3 , 1000 cm^3 씩 충전하고 밀봉하였다. 실험용기인 스티로폼 박스는 총용량 0.004 m^3 에 17.5%인 잠열재 팩 한 개를 넣고 아이스박스에는 총용량 0.008 m^3 에 17.5%인 두 개를 넣어 용적대비 동일한 충전 용량으로 실험을 수행하였다.

장 치

Table 1은 본 실험에서 사용한 이동식 저온 컨테이너의 사양으로 외기온도 35°C 에서 12시간 이상 유지할 수 있도록

소비되는 축냉량 $0.7\text{ RT}(\text{IRT}=13,890.88\text{ kJ})$ 로 환산하여 설계하였으며, 설정 가능한 온도는 $-10\sim 15^\circ\text{C}$ 이다. 제어방식은 온도 및 시간을 조합하는 방식으로 설계하였다. 축냉팩은 잠열재를 활용할 수 있도록 축냉 모듈에 직접 교환하는 방식을 채택하였다. 또한 외부의 잠열방출과 현열유입을 최소화하기 위해서 이동식 저온 컨테이너 내부에서 잠열재 팩을 교체할 수 있도록 제작하였다.

Table 1. Specification of the transportable cold storage container

Items		Transportable cold storage container
Effective internal volumetric		0.108 m ³
Storage temperature	Refrigeration	$3^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$
	Freezing	-10°C less
Phase transition time	Refrigeration	12 hr
	Freezing	11 hr
Freezing time		12 hr
Power		Single phase 220 V/60Hz
Power requirement	Refrigeration	870 W
	Freezing	680 W
Compressor		Horizontal rotary compressor
Refrigerant		R22

처리구 및 실험방법

Fig. 1은 이동식 저온 컨테이너의 상변화 특성을 분석하기 위한 개략도로써 고내온도를 각각 3, 8, 10°C 로 일정하게 유지하여 실험을 수행하였으며, 온도 설정은 지금까지 실용화되고 있는 ICE-pack의 축냉 기간보다 더 길게 연장하기 위해서 NaOH함량을 단계별로 증가한 송 등(9)의 방법에 준하여 잠열재 제조 후 방열 운전 중에 측정이 요구되는 위치를 고내 상부, 하부, 측면, 중앙 및 잠열재 내부에 열전대(T-type)를 설치하여 30초 주기로 측정하였다. 실험은 K_1 , K_2 , K_3 잠열재를 사용하였고, 축냉은 -10°C 에서 잠열재가 $-3\sim 0^\circ\text{C}$ 가 될 때까지 축냉 하였다. 축냉이 완료된 후에 이동식 저온 컨테이너 내부와 잠열재 온도가 설정한 온도에도달할 때까지 시간을 측정하였다.

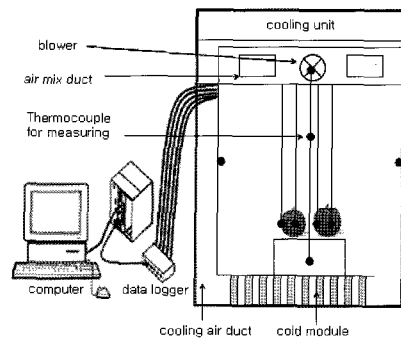


Fig. 1. Schematic of the experimental set-up.

내부온도 특성 측정

이동식 저온 컨테이너의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 저장 중 공기 유동 및 잠열재의 상변화 특성을 구명(10,11) 하기 위하여 잠열재 방냉 실험과 이동식 저온 컨테이너 내부의 온도변화를 측정하였다. 방냉시 송풍의 영향을 분석하기 위해서 상부에 냉기 흡입 및 방출 순환 팬을 설치하여, 자연대류 및 강제대류 방식으로 실험을 수행하였다.

잠열재의 상변화 온도 특성

이동식 저온 컨테이너의 상변화 특성을 분석하기 위해서 잠열재를 항온기 20℃에서 잠열을 완전 방출시키고, 이동식 저온 컨테이너의 고내온도를 각각 3, 8, 10℃로 일정하게 유지하여 실험을 수행하였으며, 실험 측정은 저장장치에 실시간으로 저장하였다. 방열 운전 중에 측정이 요구되는 위치를 고내 상부, 하부, 측면, 중앙 및 잠열재 내부에 열전대(T-type)를 설치하여 30초 주기로 측정하였다. 실험은 K₁, K₂, K₃ 잠열재를 사용하였고, 축냉은 -10℃에서 잠열재가 -3~0℃가 될 때까지 축냉 하였다. 축냉이 완료된 후에 이동식 저온 컨테이너 내부와 잠열재 온도가 설정한 온도에 도달할 때까지 시간을 측정하였다.

사과의 내부 품온 측정

사과 품온 변화는 대과, 중과를 구입하여 20℃의 항온기에 저장한 후 실험에 사용하였다. K₁ 잠열재가 이동식 저온 컨테이너에서 축냉 -10℃ 조건으로 0℃까지 축냉하여 5℃로 고내온도를 설정한 후 사과 반경을 2등분하여 대과는 깊이 40 mm와 표면 2 mm, 중과는 깊이 30 mm와 표면 2 mm 시료내부에 온도센서인 열전대(Thermocouple, T type)를 2개씩 삽입하여 온도를 측정하였다.

결과 및 고찰

잠열재 및 고내온도 변화

Table 2는 고내온도 방열 온도를 3℃로 유지시키면서 고내온도 내부 및 잠열재가 상변화 온도인 5℃에 도달할 때까지 결과 값으로 K₁ 잠열재는 보냉 온도유지가 21시간 이상으로 유지되는 결과를 얻을 수 있었다. 특히, K₁₋₁은 보냉 온도유지시간이 23시간이상으로 보냉 온도유지가 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 고내온도를 8℃로 유지시키면서 내부 및 잠열재가 상변화 온도인 10℃에 도달할 때까지 잠열재, 고내온도 좌측, 우측, 하부, 중앙 지점의 상변화 시간에 따른 온도를 측정한 결과, K₂ 잠열재는 보냉 온도유지가 21시간 이상으로 유지되는 결과를 얻을 수 있었다. 특히, K₂₋₁은 보냉 온도유지시간이 18시간 이상으로 보냉 온도유지가 가장 효과적인 것으로 나타났다.

고내온도 방열 온도를 13℃로 유지시키면서 내부와 잠열

재가 상변화 온도인 15℃에 도달할 때까지 잠열재, 고내온도 좌측, 우측, 하부, 중앙 지점의 상변화 시간에 따른 온도를 측정하였고, 그 결과 값을 Table 3에 나타내었다. Table 4는 K₃의 결과로써 총 방열시간이 70시간일 때 10~15℃까지의 잠열재 보냉 온도유지는 좌측 65, 48, 37시간, 우측 66, 47, 37시간, 중앙 66, 47, 36시간, 하부는 65, 47, 36시간으로 나타났으며, 특히, K₃₋₁은 65시간 동안 보냉 온도시간을 유지하는 것으로 분석되어 본 연구에서 제작한 이동식 저온 컨테이너와 함께 효과적인 결과를 얻을 수 있었다.

Table 2. Phase transition time of K₁ PCM from 3℃ to 5℃ of inside temperature

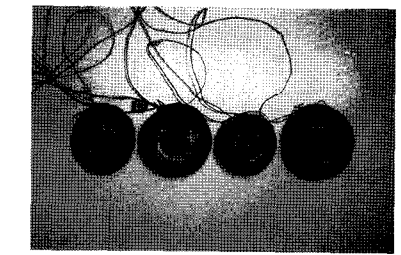
Items	K ₁			
	K ₁₋₁	K ₁₋₂	K ₁₋₃	
Phase transition time(hr)	left	23	22	22
	right	24	22	22
	middle	23	21	22
	lower	24	22	23
	PCM	32	33	28
Phase transition temperature(℃)	Freezing	-0.6	-0.5	-0.9
	Melting	3	3	3

Table 3. Phase transition time of K₂ PCM from 8℃ to 10℃ of inside temperature

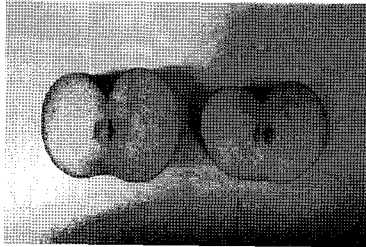
Items	K ₂			
	K ₂₋₁	K ₂₋₂	K ₂₋₃	
Phase transition time(hr)	left	27	21	21
	right	28	22	20
	middle	28	22	20
	lower	27	22	21
	PCM	32	21	21
Phase transition temperature(℃)	Freezing	-3.0	-2.8	-2.9
	Melting	7	7	7

Table 4. Phase transition time of K₃ PCM from 13℃ to 15℃ of inside temperature

Items	K ₃			
	K ₃₋₁	K ₃₋₂	K ₃₋₃	
Phase transition time(hr)	left	65	48	37
	right	66	47	37
	middle	66	47	36
	lower	65	47	36
	PCM	67	57	46
Phase transition temperature(℃)	Freezing	-3.6	-3.6	-3.8
	Melting	13	13	13



(a) locations of temperature sensors.



(b) internal locations of temperature sensors.

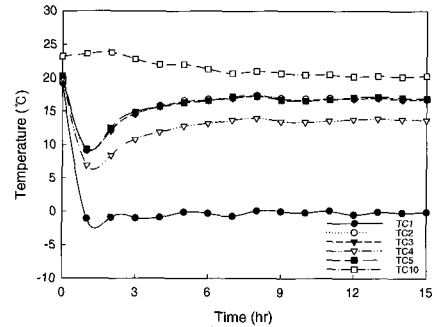
Fig. 2. Locations of temperature sensors in apple.

사과의 내부 품온 변화

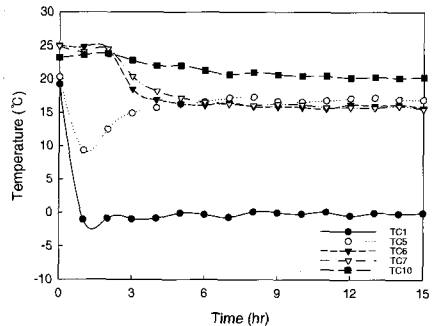
자연 대류방식은 사과 내부 품온을 상승시키기 위해 25°C에서 저장한 후 이동식 저온 컨테이너의 고내온도를 5°C로 설정하여 수행하였다. Fig. 3의 (a)는 설정온도가 5°C일 때 잠열재 온도, 고내 중앙, 하부, 좌측, 우측 및 외기온도 변화를 측정하는 것으로 잠열재 온도가 -1°C를 유지하였을 때, 한 시간 후에 측정위치인 고내의 중앙, 하부, 좌측, 우측으로 각각 9, 7, 9, 9°C로 나타났다.

(b)와 (c)는 동일한 조건에서 이동식 저온 컨테이너의 고내온도와 사과를 측정하는 것으로 중앙지점은 한 시간 후에 9°C에서 선형적으로 나타나 5시간 후에 사과와 동일한 지점까지 상승하였다. 사과는 표면으로부터 2, 40 mm의 위치에서 각각 15, 16°C로 나타났으며, 저장 15시간 까지 일정한 온도를 유지하였다. 이와 같이 자연 대류방식은 저장기간 동안에 잠열재가 5°C를 유지하였으나, 고내온도 및 사과 온도는 15, 16°C로 나타났다.

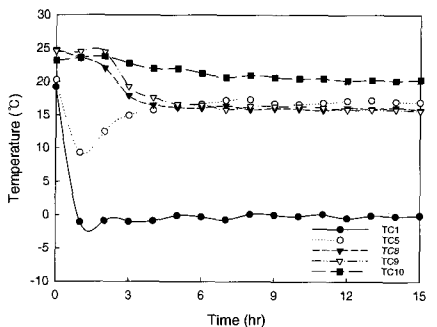
강제 대류방식은 사과 내부 품온을 상승시키기 위해 25°C에서 저장한 후 이동식 저온 컨테이너의 고내온도를 5°C로 설정하여 수행하였으며, 이 때, 순환 팬은 설정온도에 따라 자동적으로 정지와 운전을 할 수 있도록 하였다. Fig 4의 (a)는 설정온도가 5°C일 때 잠열재 온도, 순환팬, 고내의 중앙, 하부, 좌측, 우측 및 외기온도 변화를 측정하는 것으로 잠열재 온도가 -1~0°C를 유지하였을 때 한 시간 후에 측정 위치인 잠열재, 순환팬, 고내 중앙, 하부, 좌측, 우측의 온도는 각각 0, 8, 9, 7, 9, 9°C로 나타났다. 자연대류방식과 달리 모든 처리구에서 빠르게 냉각되는 것을 알 수 있다. 이것은 잠열재의 냉기공급이 다층 통로를 통해 순환 팬에 흡입되어 대류에 의해 사과에 열전달이 일어나고 고내 현열이 재



(a) room temperature



(b) apple (large size)



(c) apple (middle size)

Fig. 3. Temperature changes of at 5°C of surrounding temperature by natural convection type.

- TC1 : K₁ charged PCM pack
- TC5 : Middle side point
- TC8 : Surface of apple (middle size)
- TC9 : Center of apple (middle size)
- TC10 : Ambient temperature

측냉 되어진 잠열재에 공급되어 잠열을 흡수하기 때문에 저장 15시간 이후에도 계속해서 보냉 온도를 유지할 수 있는 것으로 판단되었다(14).

Fig. 4의 (b), (c)는 동일한 조건에서 이동식 저온 컨테이너의 사과 품온을 측정하는 것으로 잠열재가 -1~0°C이고, 고내 온도가 5~7°C사이에 모든 처리구에서 선형적으로 나타났다. 7시간 후에 사과는 표면으로부터 2, 40 mm의 위치에서

요 약

본 연구는 저온 유통 시스템을 구축하기 위해 이동식 저온 컨테이너에서 잠열재, 내부온도의 유지특성과 운영조건별 사과의 내부 품온을 살펴보았으며, 그 결과를 요약하면 축냉식 저온유통 체계에서 다목적용 농산물 유통에 적합하도록 0~5℃, 5~10℃, 10~15℃ 3가지 온도대역별 잠열재를 개발하였다. 0~5℃ 잠열재(K₁)는 C₁₄H₃₀과 Sodium polyacrylate, 5~10℃ 잠열재(K₂)는 C₁₄H₃₀, C₁₈H₃₈, Sodium polyacrylate, 10~15℃ 잠열재(K₃)는 C₁₄H₃₀, C₁₈H₃₈, Sodium polyacrylate를 혼합하여 제조하여 잠열재로 사용한 결과 이동식 저온 컨테이너의 내부온도 유지특성은 K₁ 잠열재는 보냉 온도유지가 21시간 이상으로 유지되는 결과를 얻을 수 있었다. K₂의 경우 보냉 온도유지가 18시간 이상으로 유지되는 결과를 얻을 수 있었다. K₃의 경우 모든 잠열재에서 61시간 이상으로 10~15℃ 내부온도 유지특성을 나타내었다. 사과 내부 품온 변화는 잠열재 온도 0℃에서 고내온도 5℃에 도달할 때까지의 이동식 저온 컨테이너에서 잠열재 보냉 유지시간은 K₁, K₂, K₃ 처리구에서 20시간 이상으로 유지되는 것으로 나타났으며, 사과의 내부 품온 변화는 자연대류 방식의 경우 5시간 후에 표면과 중심온도가 각각 15℃, 16℃로 나타났으나 강제대류방식은 한 시간 후에 모든 측정지점에서 7℃의 품온을 보였으며, 보냉 온도유지시간을 15시간 이상유지 하는 것으로 나타나 자연대류 방식의 이동식 저온 유통체계보다는 강제 대류식 유통체계가 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김동철, 김병삼, 이세은, 김의용 (1993) 산지청과물 종합유통시설 설치에 필요한 관련기술 개발. 한국식품개발연구원 보고서.
2. Core, K. L. (1987) The Use of Microencapsulated Phase-Change Materials to Enhance Heat Transfer in Liquid-Coupled Heat Exchange Systems, M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
3. 이금복 (2005) 다목적용 저에너지형 축냉식 유통시스템의 내부 온도분포 및 공기 유통장 해석. 숭실대학교 연구보고서.
4. 백종현 (2003) 축냉분야 기반기술 구축을 위한 PCM(잠열축냉물질) 개발, 중소기업과제보고서.
5. 전용호, 이상렬, 황규현, 류인근 (2004) 축냉식 수송겸용 냉동/냉장고 개발. 대한설비공학회, 동계학술발표대회 논문집, p.512-517.
6. 신상윤, 박형준, 유해성, 문성우 (2004) 마이크로캡슐 PCM의 열역학적 특성 실험. 대한설비공학회 하계학술

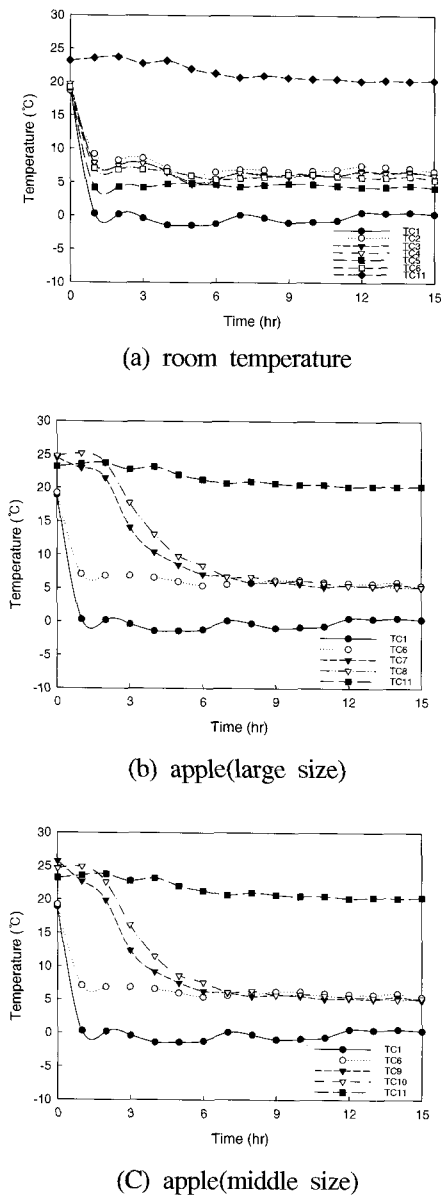


Fig. 4. Temperature changes of at 5℃ of surrounding temperature by forced convection type.

- TC1 : K₁ charged PCM pack
- TC2 : Fan point
- TC3 : Left point
- TC4 : Right point
- TC5 : Lower point
- TC6 : Middle point
- TC11 : Ambient temperature

고내온도와 동일한 5~7℃로 측정되었으며, 그 후에는 저장 15시간까지 일정한 온도를 유지하였다.

결과적으로 축냉 장치 및 잠열재 위치를 상부와 측면 방식인 자연대류방식보다 하부방식인 강제 대류방식에 의한 시스템 구축이 매우 효과적인 것으로 나타났다.

- 대회 논문집, p.541-546.
7. 이재구, 최영찬, 이시훈, 김용구, 이원목 (2004) 잠열미립자 슬러리를 이용한 열저장 및 수송특성. 대한설비공학회 하계학술대회 논문집, p.382-387
 8. 송현갑, 노정근, 문영모 (2004) 식·의약품 저온 저장을 위한 H₂O-NaOH 혼합형 잠열재의 냉축 열 특성. 한국태양에너지학회, 24, 7-12.
 9. 황윤제, 최종민, 이재구 (2005) 마이크로캡슐 잠열재 이용 기술현황. 설비저널, 34, 33-38
 10. 이성범 (1999) 빙축냉 시스템에서의 열저장 성능향상에 관한 연구. 인하대학교 석사학위논문.
 11. 정진웅, 김병삼, 차환수, 권기현, 최정희 (2005) 국내산 농축산물의 신선도 유지 및 에너지 절약을 위한 다목적용 축냉식 저온 유통 시스템개발. 한국식품연구원보고서.
 12. Pal, D. and Joshi, Y. K. (1995) "Application of phase change materials to thermal control of electronic modules: A Computational study". *Advanced in Electronic Packaging*. 10, 1307-1315.
 13. Romesberg, L. J. (1988) Enhancement of heat transfer in liquids with microencapsulated Phase-Change Materials. M. Sc. Thesis, North Carolina State University.
 14. Lee, S.W., Min, M.K. and Lee, H.Y. (1999) An Experimental Study on the Enhancement of Heat Transfer In Liquids With Microencapsulated Phase-change Material. *International Conference on Renewable and Advanced Energy Systems 21st Century* p.1-6.

(접수 2007년 11월 2일, 채택 2008년 1월 4일)